

## 광소자 정렬용 극초정밀 다축 위치 제어장치 개발

정상화(조선대), 이경형\*(조선대 대학원), 차경래(조선대 대학원), 김현욱(조선대 대학원),  
최석봉(조선대 대학원), 김광호(조선대 대학원), 박준호(조선대 대학원)

### Development of Multi-axis Nano Positioning Stage for Optical Alignment

S. H. Jeong(Mech. Eng. Dept., CSU), K. H. Lee\*(Graduate School., CSU), K. R. Cha(Graduate School., CSU),  
H. U. Kim(Graduate School., CSU), S. B. Choi(Graduate School., CSU),  
G. H. Kim(Graduate School., CSU), J. H. Park(Graduate School., CSU)

#### ABSTRACT

As optical fiber communication grows, the fiber alignment become the focus of industrial attention. This greatly influence the overall production rates for the opto-electric products. We proposed multi-axis nano positioning stage for optical fiber alignment. This device has 3 DOF translation and sub nanometer resolution. This nano stage consist of 3 PZT-driven flexure stages which are stacked parallel. The displacement of it is measured with capacitance gauge and is controlled by computer-embedded main controller. The design process of flexure stage using FEM is proposed and the performance evaluation of this system is verified with experiments.

**Key Words :** Optical fiber Alignment(광정렬), PZT Actuator(압전액츄에이터), Flexure(탄성힌지), Capacitance gauge(정전용량형 센서), FEM(유한요소법), Resolution(분해능), Travel(이송범위)

#### 1. 서론

초고속 통신망이 확대되고 광통신이 발달함에 따라 광섬유 정렬은 광산업에서 중요한 관심사가 되었다[1]. 그 이유는 광정렬이 광통신에 사용되는 광통신 부품의 생산성에 중대한 영향을 미치기 때문이다[2]. 광정렬은 신호가 입력되는 하나의 광섬유 스택과 하나 이상의 신호가 출력되는 다른 광섬유 도파로를 접합하는 공정의 전 단계 공정이다. 정렬 정밀도는 제품의 광소자 품질에 큰 영향을 미치는 요소이다. 광섬유를 접합하는 공정에서는 서브마이크로미터 수준의 정밀도를 요구한다.

본 연구에서는 평면도파로형 분배기(PLC), DWDM, AWG 등의 광부품을 정렬하는 공정에 적용하기 위해서 광소자 정렬용 극초정밀 다축 위치 제어 장치를 개발하였다. 개발된 장치는 3개의 초정밀 단축 스테이지가 직렬로 연결되어 3자유도 병진운동을 수행한다. 각각의 스테이지는 압전액츄에이터로

구동되며 탄성힌지 가이드 구조를 가지고 있다.

액츄에이터에서 발생하는 초정밀변위를 확대하고 안내하는 역할을 하는 탄성힌지 가이드를 개발하기 위하여 유한요소법을 이용하여 모드해석, 주파수해석 및 응력해석을 수행하였으며 이를 설계에 반영하였다. 또한 초정밀 다축 위치제어 장치의 운동특성을 실험을 통해 시스템 성능을 검증하였다.

#### 2. 연구내용

##### 2.1 시스템 구성

본 연구에서 개발한 광정렬용 극초정밀 다축 위치제어장치의 구성은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 보는 것과 같이 시스템은 3자유도(X, Y, Z) 운동을 하는 스테이지부와 스테이지의 변위를 측정하는 정전용량형 센서와 컴퓨터에 장착된 메인 컨트롤러로 구성된다. 여기서 압전 액츄에이터에 전원을 공급해주는 파워서플라이 모듈은 D/A 채널에

연결되고 정전용량형 센서는 A/D채널로 입력된다.

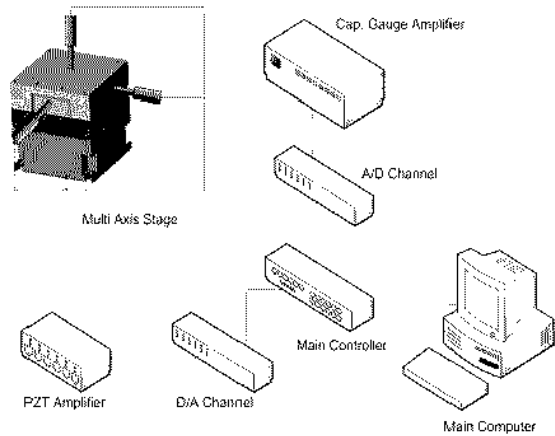


Fig. 1 Schematic diagram of precision positioning system

## 2.2 Flexure 설계

본 연구에서는 Flexure를 설계하기 위하여 유한요소 해석법을 도입하였다. 모델링된 각축의 Flexure에 액추에이터가 장착되는 접합면에 변위를 입력시켜 그때의 취약부의 파괴여부와 Flexure 전체의 응력분포 및 스테이지의 발생변위를 파악하였다. 또한 압전액추에이터의 발생력의 변화에 대해 Flexure의 응력분포 및 발생변위를 파악하였다. 유한요소 해석을 수행함으로써 모델링된 Flexure의 설계 타당성을 검증할 수 있었고 액추에이터의 변위와 힘의 변화에 따른 각각의 스테이지의 발생변위의 데이터를 얻을 수 있었다.

### 2.2.1 Flexure 모델링

Flexure는 강체의 탄성변형을 이용하여 압전액추에이터에서 발생하는 변위를 확대시키고 선형적으로 안내하는 기구이다. 본 연구에서 개발된 Flexure의 작동원리는 Fig. 2에 나타내었다. 압전액추에이터에서 15 μm의 변위가 발생되면 약 6.67배 정도 변위가 확대되어 운동단에서 100 μm가 발생하는 구조로 설계하였다.

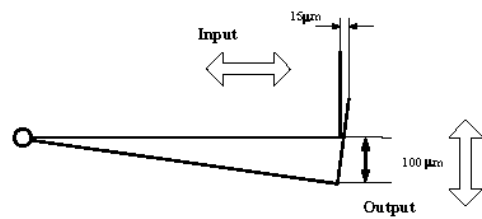
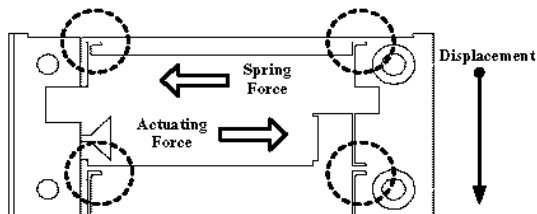


Fig. 2 Mechanism of Flexure

## 2.3 Flexure 응력 및 진동해석

### 2.3.1 Flexure 응력해석

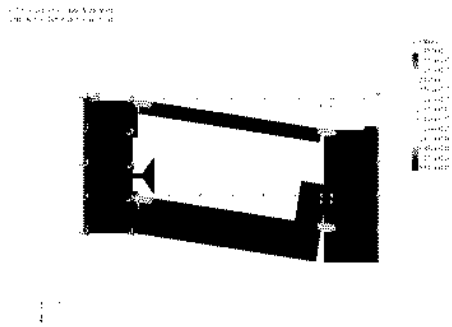
Flexure의 모델링의 타당성을 검증하기 위하여 액추에이터의 발생력과 발생변위에 대한 Flexure의 변형과 응력 분포를 해석하였다. 첫 번째 입력 조건은 액추에이터 작용점에 힘을 입력하였다. 이는 발생력에 대해 각축의 스테이지의 변위가 얼마나 발생하는지를 알기위한 것이다. 두 번째 입력 조건은 변위 발생지점에 변위를 입력하였다. 이 때 Flexure의 응력분포 및 파괴 여부를 해석하였다.

Table 1은 유한요소해석을 수행하기 위한 재료의 물성치와 경계조건을 나타낸 것이다.

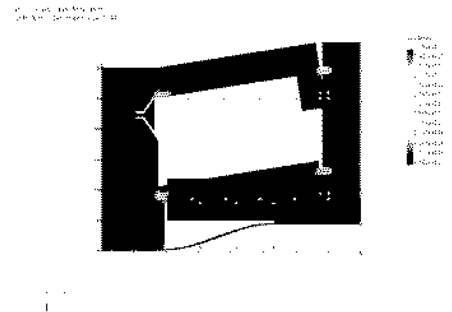
Table 1 Input Condition for FEM

Mesh	
Mesh Type	Solid Mesh
Mesh Type	Standard
Element Size	0.86977 mm
Tolerance	0.0043489 mm
Nodes	95441
Elements	65610
Properties	
Elastic Modulus	7.2e+10 N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.34
Shear Modulus	2.7e+10 N/m <sup>2</sup>
Density	2800 kg/m <sup>3</sup>
Yield Strength	6.8 e+08N/m <sup>2</sup>
Boundary Condition	
- Force on Face 427(PZT Actuator) : 16 N	
- Displacement on Face 2186 : 100 μm	
- Fix on Face 2068 with 6 DOF	

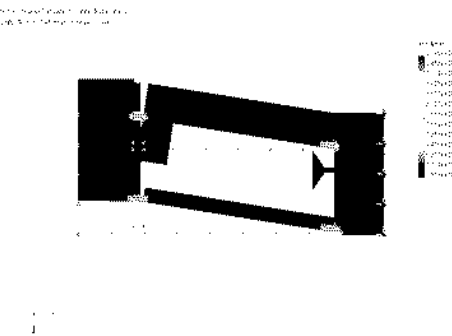
Flexure의 운동단에서 100 μm의 변위가 발생할 때 그때의 Flexure에 발생하는 응력분포를 파악하였다. 이때 가장 변형이 심하게 발생하는 부분의 응력집중 현상을 살펴보았다. 해석결과 X축 Flexure의 최대응력은 3.8532E+7 N/m<sup>2</sup>, Y축은 3.756E+7 N/m<sup>2</sup>, Z축이 3.766E+7 N/m<sup>2</sup> 이 발생하였는데 이는 두랄루민의 항복하중 6.8 e+08N/m<sup>2</sup> 임을 고려하면 소성변형이 발생하지 않음을 알 수 있다. 발생변위에 따른 응력분포 해석 결과는 Fig. 3에 나타내었다.



(a) Stress in X-Axis Flexure



(b) Stress in Y-Axis Flexure



(a) Stress in Z-Axis Flexure

Fig. 3 Stress Analysis with 100  $\mu\text{m}$  input

### 2.3.2 진동해석

외부진동 및 장치내의 액츄에이터에 대한 진동 안정성을 평가하고 진동모드를 파악 위하여 극초정밀 다축 위치 제어장치의 진동해석을 수행하였다. 입력 조건은 장치 밀면을 고정하고 X, Y, Z축 방향으로 100 N을 입력하였다. 해석은 10차 모드까지 수행하고 결과를 나타내었다. 진동해석 결과 가장 큰 진동이 나타나는 1차 모드에서 156.18 Hz가 나타났다. 내부 진동원인 압전액츄에이터의 고유진동수가 20 kHz임을 고려할 때 공진현상이 발생하지 않음을 알 수 있었다. Table 2는 진동해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4는 진동해석후 모드형태를 나타낸 것이다.

Table 2 Frequency Analysis of Ultra Precision Multi-Axis Stage

Mode	Frequency (Hz)	Mode	Frequency (Hz)
1	156.18	6	1385
2	189.69	7	1936.4
3	431.59	8	1946.4
4	812.1	9	2759.1
5	975.04	10	3843.4

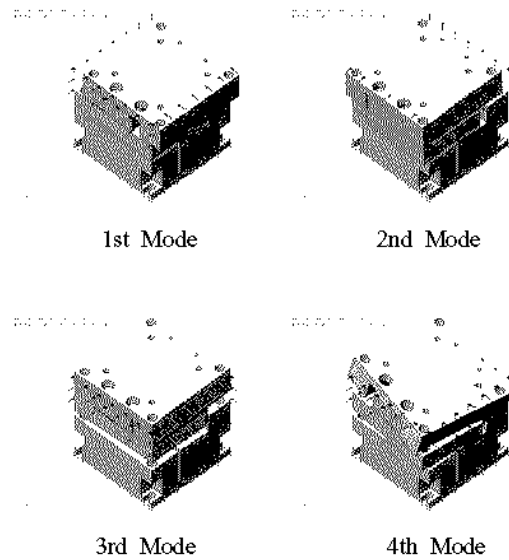


Fig. 4 Mode Shape of Ultra Precision Multi-Axis Stage

## 3. 성능평가

### 3.1 초정밀 위치구동 구동범위 및 분해능 측정

Fig. 5는 제작된 초정밀 다축 위치 제어장치를 나타낸 것이다. 제작된 장치의 성능을 평가하기 위하여 구동범위 및 분해능을 시험하였다. 장치 구동은 Main Controller에서 DSP Terminal을 통해 PZT Amplifier에 입력전압을 입력하였다. 초정밀 다축 위치 제어장치의 변위는 25 mm의 분해능을 갖는 정전용량형 센서를 통해 측정하였다. 분해능 측정 실험을 위한 실험조건은 5 mV씩 계단함수로 입력하였고 구동범위 측정 실험에서는 1 V 스텝의 계단함수를 입력하였다.

실험결과 분해능은 Y축에서 최소 25 mm 정도로 나타났으며 최대변위 발생범위는 Y축에서 99  $\mu\text{m}$  정도로 나타났다. Fig. 6은 X축 방향의 분해능을 나타낸 것으로 약 31 nm로 검출되었다. Fig. 7은 Y축 방향의 구동범위를 나타낸 것으로 99  $\mu\text{m}$ 의 구동 범위를 보였다. Table 3은 초정밀 위치 제어장치의 각 축 방향별 분해능과 구동범위를 나타낸 것이다.

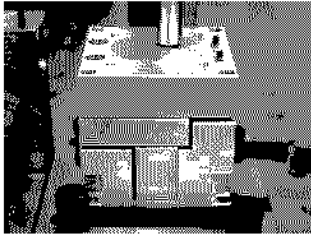


Fig. 5 Multi-axis ultra precision stage

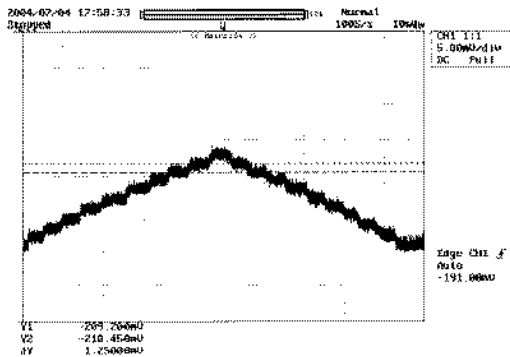


Fig. 6 Resolution of X-Axis

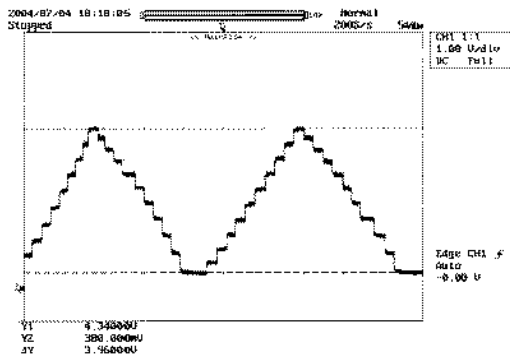


Fig. 7 Travel of Y-Axis

Table 3 Frequency Analysis of Ultra Precision Multi-Axis Stage

Axis	Resolution	Travel
X	31 nm	97 µm
Y	25 nm	99 µm
Z	32.5 nm	93.25 µm

#### 4. 결론

본 논문에서는 광통신에 사용되는 광소자를 생산하는 공정 중 가장 핵심인 광정렬공정에서 정밀도와

정렬시간을 단축시킬 수 있는 초정밀 다축 광정렬 위치 제어장치를 개발하였다. 개발된 장치는 직렬로 배치된 3개의 Flexure 스테이지에 의해 나노미터 수준의 3자유도 직선운동을 수행한다. Flexure 스테이지를 설계하기 위하여 유한요소해석법을 사용하여 발생변위와 응력발생 그리고 응력발생에 따른 발생 변위 관계를 검증하였고 위치 제어 장치 전체의 진동 모드를 해석하였다. 해석 결과 설계하였던 스테이지는 발생 변위(100 µm)를 구동할 때 각각의 축은 모두 소성변형에 대해 안정한 것으로 판명되었고 또한 외부 진동 및 내부 액츄에이터의 공진에 대해서도 안정한 것으로 판명되었다.

해석결과를 토대로 설계, 제작된 장치의 성능을 평가하고자 정전용량형 센서를 이용하여 분해능과 구동범위를 측정하였다. 측정 결과 각각의 축들의 분해능은 최대 25 nm, 구동범위는 99 µm로 나타났다. 이 결과로 본 연구에서 개발된 장치는 광정렬의 정밀도를 높여줌으로써 광정렬 시간을 단축시켜줄 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- Hayes, J, "Fiber Optics Technician's Manual 2nd Ed., Delmar Publication, 2001
- M. Murakawa, H. Nasato, and T. Higuchi, "Automatic Optical Fiber Alignment System using Genetic Algorithms", Proceedings of 2003 Congress on Evolutionary Computation (CEC 2003), pp. 2096-2101, IEEE, 2003
- N.Taiguchi, "Future trends of nanotechnology", Int. Journ. Japan Soc Prec. Eng., Vol. 26, No. 1, Mar, 1992, p1-7
- D. whitehouse, "Nanotechnology instrumentation , Measurement & Control", Vol. 24, 1991. p34-46
- J. Manul, C. Hernandez, V. Hayward, "Phase control approach to hysteresis reduction", IEEE Control System Technology Vol. 20, No. 1 pp.17-26
- 이창우, "이중서보를 이용한 초정밀 X-Y 테이블 평면 3자유도 위치제어", 한국과학기술원 박사학위논문, 1996